もう一度学ぶ電磁気学の世界

# 第10回
# 900MHz帯RFIDタグのアンテナ

小暮裕明

ボード　ビギナーズ

**ダイポール・アンテナのどこから電波が発射されるのか，電磁界シミュレーションで，その周りにできる電界や磁界を描くことで，放射のメカニズムがわかってきました．無線通信は，ユビキタス社会の実現に欠くことのできない技術です．しかし，その要であるアンテナは，使用する周波数によっては，実装できる寸法の制約を大きく受けます．広範囲のアプリケーションで活用が期待されているRFID（radio frequency identification）タグ注1では，13.56MHz，900MHz，2.45GHzなどの周波数が使われますが，13.56MHzの波長は22mもあり，半波長ダイポールではとても実装できません．一方，2.45GHzは，実装上ほどよい波長といえそうです．今回は小型化・広帯域化が望まれる，900MHz帯RFIDタグのアンテナについて調べます．（筆者）**

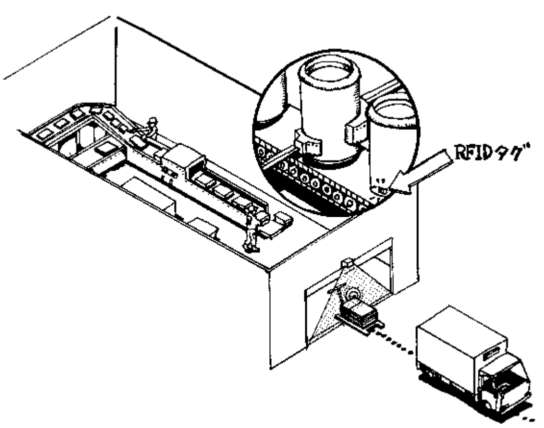



**図1　サプライ・チェーンを実現するRFIDタグ**
RFIDタグは，製造段階で製品に貼り付けて，出荷，配送，販売に至る一連の業務のつながり（いわゆるサプライ・チェーン）を，IT技術で一括管理するシステムに使われる．

## 1. RFIDタグのアンテナ

### ● RFIDの用途

13.56MHz帯は，いわゆるISMバンド注2の一つで，すでに数多くの業務で実績がある周波数帯です．今日のRFIDタグのような用途を前提として，何年も前から研究・開発が進んでいたようです．国内ではICテレホン・カードやJR東日本のSuica，JR西日本のICOCAなどで，大量に使われるようになりました．

複数の企業がICチップの開発に参入し，コストダウンが進んだことで，バーコードに代わる用途も現実味を帯びてきました．国内ではすでに13.56MHzと2.45GHzで稼働しています．

スーパーマーケットで扱う多種の品物に貼り付けた実験では，それぞれの特徴が浮き彫りになりました．13.56MHzのRFIDタグでは，ビール缶などの金属部分に密着した場合以外は，通信距離の違いはあるものの，おおむね代表的な品物で読み取れるという結果が得られています．一方2.45GHzでは，読み取れる品目数が13.56MHzの1/3以下に留まり，ペットボトルや大根といった，水分を含む品物にじかに貼り付けた場合は，ほとんど読み取れなかったようです(1)．

13.56MHzと2.45GHzの中間にあるのが900MHz帯です．この周波数を使ったRFIDタグは，13.56MHzよりも通信距離をはるかに伸ばすことができ，2.45GHzで顕著な水の影響も少ないという特徴があります．欧米では**図1**のように，製造段階で製品に貼り付けて，出荷，配送，販売に至

注1：RFIDタグは，無線ICタグなどとも呼ばれる．微小な無線ICにアンテナを付けた荷札（タグ）で，識別（identification）に利用される．
注2：ISMバンド（Industrial，Scientific and Medical Band）とは，産業，科学，医学用として世界的に割り当てられている周波数．

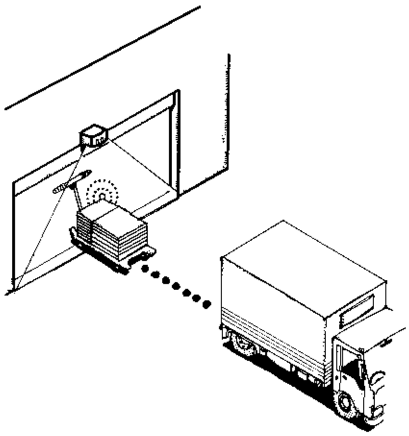


**図2　製品を梱包した段ボール箱にRFIDタグを貼る**
約16cmのアンテナを持つRFIDタグは，製品を梱包した段ボール箱に貼る場合は許容できる．

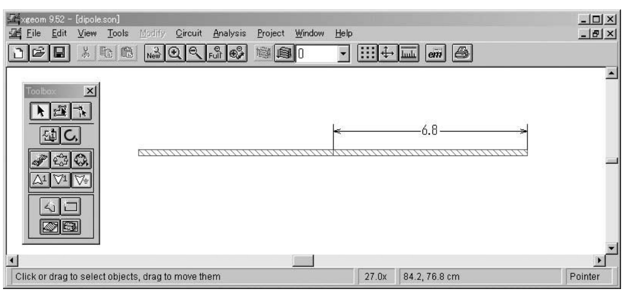



**図3　半波長ダイポール・アンテナのモデル**
Sonnet Liteを用いたモデルである．エレメント長は13.6cm．

る一連の業務のつながり（いわゆるサプライ・チェーン）を，IT技術で一括管理するシステムが開発されています．

## ● 900MHz帯の半波長ダイポール・アンテナ

950MHzの半波長ダイポール・アンテナは，エレメント長が約16cmになります．これは**図2**のように，製品を梱包した段ボール箱に貼る場合は許容できる寸法かもしれません．しかし，より小さい製品に貼るRFIDタグのアンテナとしては，もう少し小型化するくふうが必要です．

**写真1**は，米国Symbol Technologies社（旧Matrics社）のRFIDタグで，寸法は1インチ（2.54cm）×6インチ（15.24 cm）です．中央の微小ICチップ周りの複雑な接続は，おそらくインピーダンス整合を実現するための構造でしょう．

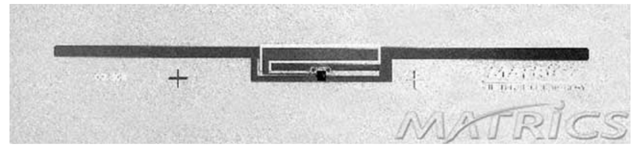



**写真1　UHF帯用RFIDタグの例**
米国Symbol Technologies社（旧Matrics社）の製品．

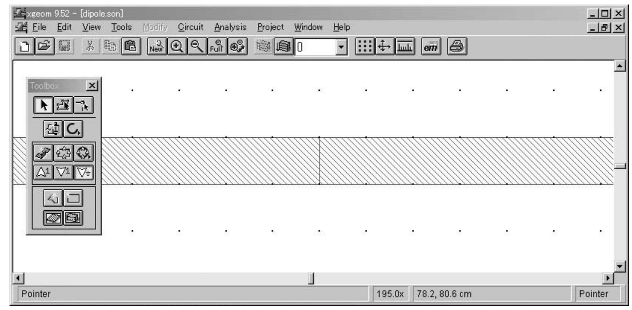



**図4　左右のエレメントを中央で接続**
Boxの寸法に比べてダイポールが非常に小さいので，ズーム表示している．左右のエレメントを別々に描き，中央で接続する．

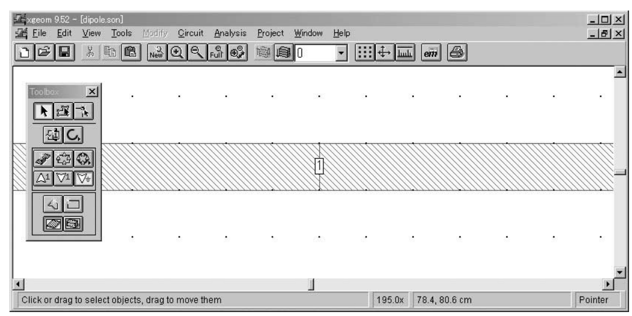
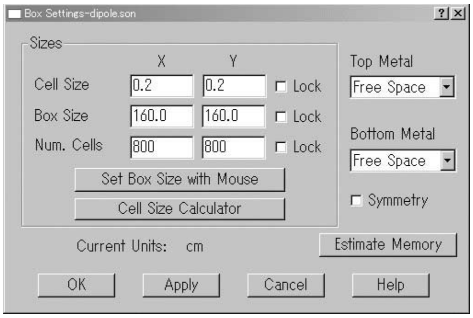



**図5　中央の接続部にポート1を作成**
Toolbox左上の[Add port]ボタンをクリックし，中央の接続部上でマウスの左ボタンをクリックする．

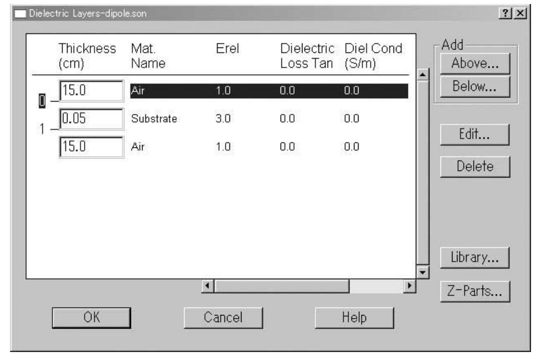
**図3**はSonnet Lite[注3]を用いたモデルで，エレメント長は13.6cmです．画面左のToolbox右下にある［Adds a rectangle］ボタンをクリックし，左右のエレメントを別々に描き，**図4**のように中央で接続します．次に**図5**に示すように，Toolbox左上の［Add port］ボタンをクリックし，中央の接続部上でマウスの左ボタンをクリックしてポート1を作成します．

「Circuit」→「Box...」を選んで表示されるダイアログ・ボックスで，**図6**のように数値を入力します．離散化の単位

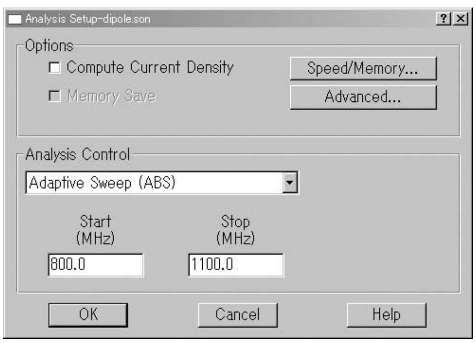
注3：無償版のSonnet Liteは，本誌付属のCD-ROMに収録されている．Sonnet技研のWebサイトからもダウンロードできる．
URLは「http://www.sonnet software.co.jp/」．



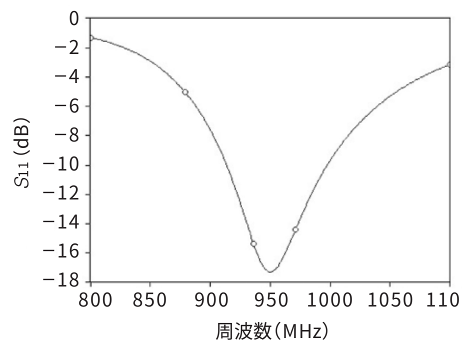

◀ **図6**
**Box Settingダイアログ・ボックス**
セル寸法などを入力する．




▶ **図7**
**Dielectric Layersダイアログ・ボックス**
アンテナの上と下に15cm厚の空気層を設ける．




◀ **図8**
**解析周波数の設定**
「Adaptive Sweep (ABS)」でStartを800MHz，Stopを1100MHzと設定する．




▶ **図9**
**$S_{11}$の結果**
950MHz付近で$S_{11}$(反射係数)の値が最小になっている．

であるセルの寸法は，横($x$)，縦($y$)とも0.2cmで，解析空間を設定するBox Sizeは160cm×160cmです．Sonnetは閉じた環境のモーメント法[(2), (3)]なので，アンテナのモデルはBoxの側壁まで1波長程度離す必要があります．950MHzでは40cm程度になりますが，安全のため，それぞれ80cmをとっています．また，解析空間の上下については，Top MetalとBottom MetalをFree Spaceにすることで，自由空間に設定できます(**図6**の右にある二つのプルダウン・メニュー)．

次に「Circuit」→「Dielectric Layers...」を選んで表示されるダイアログ・ボックスで，**図7**のようにアンテナの上と下に，15cm厚の空気層を設けます．これらはTop MetalとBottom Metalまでの距離ですが，Free Spaceに設定した場合，Box上下の境界は，表面インピーダンスが377Ω/□と考えられます．これは自由空間の特性インピーダンスですから，アンテナから半波長～1波長程度離す必要があります(本誌2004年11月号，pp.139-146の連載第7回を参照)．

アンテナは5mm厚の基板上に描くので，**図7**の右上の「Add」のところで1層追加してから厚さを入力します．デフォルトの層は空気層ですから，[Edit]ボタンを押して，真ん中の基板層の比誘電率を3.0にするだけです．

解析周波数は，**図8**のように「Adaptive Sweep (ABS)」でStartを800MHz，Stopを1100MHzと設定します．モデル・ファイルを保存したら，「Project」→「Analyze」を選択して，解析を開始します．わずかな解析時間で**図9**の結果が得られます．950MHz付近で$S_{11}$(反射係数)の値が最小になっています．日本で使用するRFIDタグのアンテナとして使えそうです．

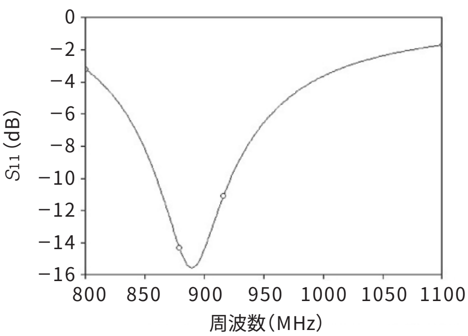
### ● エレメント長の決定

電磁波の波長と周波数の関係は，次式で表されます．

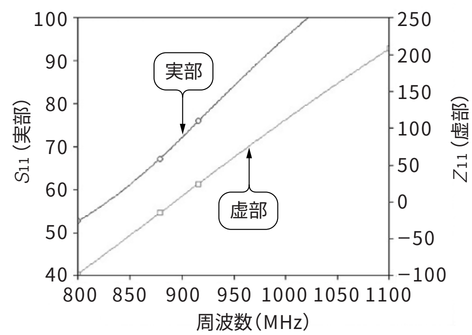
$$\text{波長}=\text{真空中の電磁波の速度}/\text{周波数} \quad (1)$$

950MHzの波長は，$3\times10^8/950\times10^6=0.316$mです．半波長は15.8cmですが，Sonnetで得た最適のエレメント長は13.6cmです．小型化できたので結果的にはつごうがよいのですが，その理由が知りたくなります．

そこでエレメント長が15.8cmのモデルを作って調べてみます．エレメントの幅やBoxの寸法は同じですが，基板をなくして，自由空間に浮いたアンテナとします．**図10**のように890MHzで共振しているようです．ポートのインピーダンスを表示すると，**図11**からわかるように，890MHz




◀ **図10**
**自由空間に浮いたアンテナの解析**
890MHzで共振している．




▶ **図11**
**ポートのインピーダンス**
890MHz付近ではリアクタンスがほぼゼロである．

付近ではリアクタンスがほぼゼロになっています．

一方，半波長相当の950MHzでは$84+j60$［Ω］ですから，誘導性のリアクタンスがあります．アンテナの共振周波数では，給電点のインピーダンスが純抵抗になります．950MHzで共振させるためには，正のリアクタンスを打ち消し，エレメントの寸法をわずかに短く調整する必要があります．

さらにエレメントが短くなる要因としては，基板の誘電体材料による波長短縮効果があります．エレメント長が13.6cmのダイポール・アンテナの基板を取り除いたらどうなるでしょうか．**図12**は，**図10**の結果に重ねて表示したグラフです．誘電体がないモデルは，共振周波数が1.04GHz付近にあります．

マイクロストリップ線路などの伝送線路を伝搬する電磁波は，その一部が基板の誘電体内にあることで，空間を伝わる速度よりも遅くなります．その結果，波長短縮の効果を生じるようになりますが，アンテナ近傍にできる電界の一部も基板の誘電体内に分布するので，やはり波長短縮効果によって，共振周波数が空間の場合と比べて低くなります．これを表す物理量に波長短縮率があり，次式で表されます．

$$波長短縮率 = \lambda / \lambda_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_{eff}} \qquad (2)$$

$\lambda$：伝搬波長，$\lambda_0$：自由空間での波長，$\varepsilon_{eff}$：実効誘電率

式(2)から，共振周波数が低いほうへずれる度合いは，材料の誘電率によって決まることがわかります．実効誘電率は，ストリップ線路のように均質の誘電体で満たされている場合はその誘電率に等しくなります．しかし，マイクロストリップ線路のように空間に露出している場合，効果が小さくなると考えられ，実効的な値が必要です．

基板上に実現したアンテナも，誘電体の占める体積や状態によって実効誘電率が決まりますが，簡単な式を導くことは困難です．電磁界シミュレーションは，もちろんこの物理現象を含んで計算しますから，**図12**のように違いがわかります．

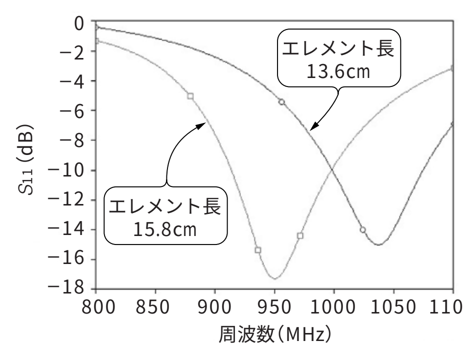



**図12　誘電体がないモデル**
共振周波数が1.04GHz付近にある．

**図7**では比誘電率3.0の層の上面（Level番号0）にアンテナを描いていますが，例えば同様の誘電体層を追加して，2層でエレメントをはさむと，共振周波数はさらに低い900 MHzになります．

## 2．アンテナの変形と周囲の影響

### ● 便利なパラメータ・スイープ機能

このように誘電体基板でアンテナを作る場合，動作周波数の波長だけでエレメント長を決めるわけにはいきません．そこでエレメントの寸法をパラメータとして，ある範囲内で自動的に変化させたときのシミュレーション結果が得られると便利です．

**図13**は，「Tools」→「Add Parameter」→「Add Symmetric」を選択した後，エレメントの左上角をマウスの左ボタンでクリックして，小さい白色の正方形を表示したと

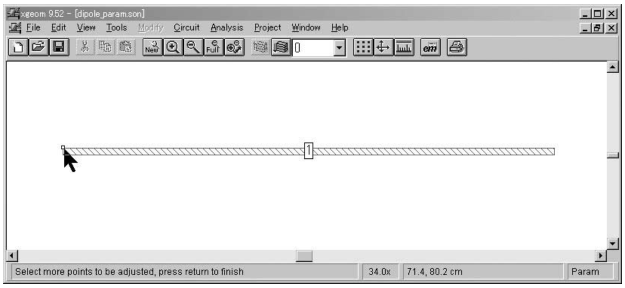
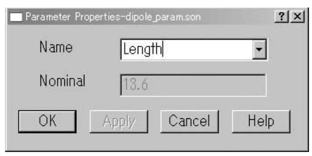



**図13　パラメータ・スイープの設定**
「Tools」→「Add Parameter」→「Add Symmetric」を選択し，エレメントの左上角をマウスの左ボタンでクリックする．

**▶ 図14**
**Parameter Propertiesダイアログ・ボックス**
パラメータ名を入力する．



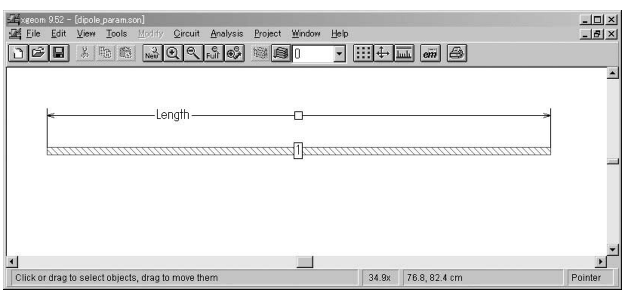




**図15　パラメータの表示**
矢印が表示される．マウスの左ボタンを押して，見やすい位置で固定するとよい．

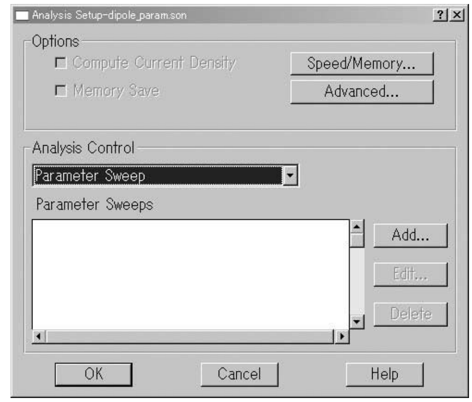



**図16　Analysis Setupダイアログ・ボックス**
「Analysis」→「Setup...」を選択すると表示されるダイアログ・ボックス．Analysis ControlをParameter Sweepにして，[Add...]ボタンを押す．

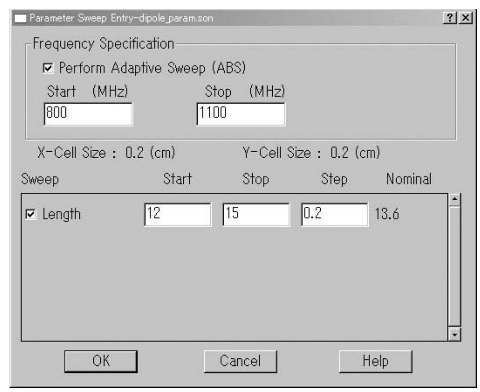



**図17　Parameter Sweep Entryダイアログ・ボックス**
周波数範囲とパラメータ・スイープ範囲，刻みを設定する．

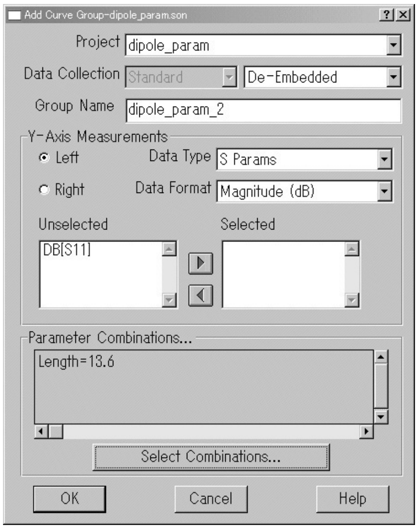
ころです．続いて以下の順に操作すると，**図14**のようなダイアログ・ボックスが表示されます．

1）エレメントの左上角と左下角を含む領域を，マウスの左ボタンを押したまま囲むと，二つの角が小さい黒色の正方形で表示される．
2）[Enter]キーを押す．
3）エレメントの右上角をマウスの左ボタンでクリックすると，小さい白色の正方形が表示される．
4）エレメントの右上角と右下角を含む領域を，マウスの左ボタンを押したまま囲むと，二つの角が小さい黒色の正方形で表示される．
5）[Enter]キーを押す．

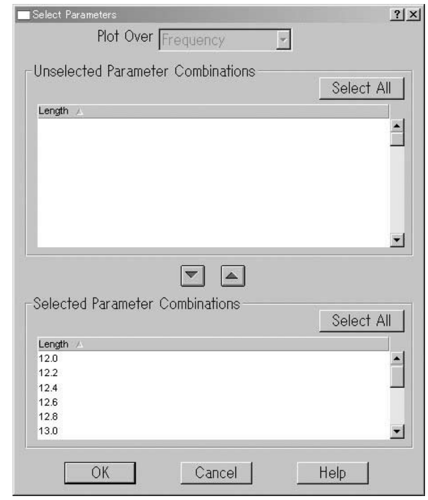
Nameの欄にはパラメータの名まえを設定しますが，ここでは「Length」と入力します．[OK]ボタンを押すと，**図15**のような矢印が表示されるので，マウスの左ボタンを押して見やすい位置で固定します．矢印の中央に小さい白色の正方形が表示されていますが，これは対称パラメータであることを示しています．つまり，Lengthの値が変われば，両端のポイントは同量だけ変化することになります．

次に，「Analysis」→「Setup...」を選択して表示される**図16**のダイアログ・ボックスで，Analysis ControlをParameter Sweepにして，[Add...]ボタンを押します．**図17**のように，上段に周波数範囲を，下段にパラメータ・スイープ範囲と刻みを設定して[OK]ボタンを押します．

モデル・ファイルを保存した後，「Project」→「Analyze」を選択してシミュレーションを開始し，終了したら[View Response]ボタンを押して$S_{11}$のグラフを表示します．パラメータ・スイープに応じたすべての結果を表示するために，「Curve」→「Add Curves...」を選択して**図18**のダイアログ・ボックスを表示します．そして，[Select Combinations...]




◀ **図18**
**Add Curve Groupeダイアログ・ボックス**
「Curve」→「Add Curves...」を選択する．




▶ **図19**
**Select Parameterダイアログ・ボックス**
［Select All］ボタンを押し，中央の［▼］ボタンを押す．

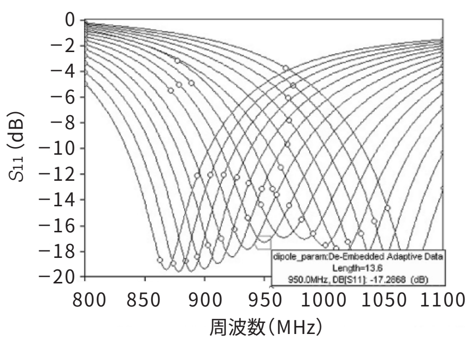



**図20　パラメータ・スイープの結果**
所望の950MHz付近で最適なLengthの値が13.6cmであることがわかる．

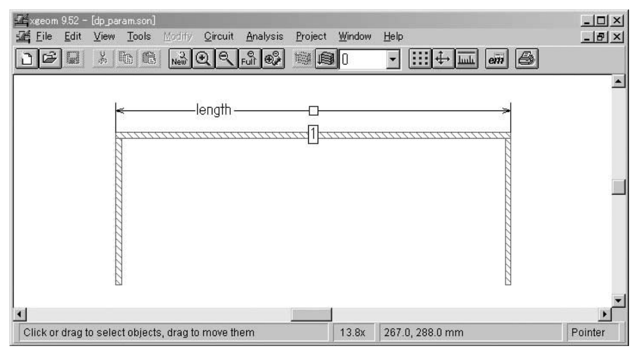



**図21　エレメントを折り曲げたモデル**
曲げた両端部の長さを2.6cmで固定し，水平部の寸法を可変としている．

ボタンを押して表示されるダイアログ・ボックスにおいて，**図19**のように右上の［Select All］ボタンを押します．次に中央の［▼］ボタンを押した後，［OK］ボタンを押し，Selected欄にDB［S11］があることを確認します．［OK］ボタンを押すと，**図20**のようなグラフが表示されます．

パラメータ・スイープで得られたグラフから，所望の950 MHz付近で最適なLengthの値が13.6cmであることが容易にわかります．

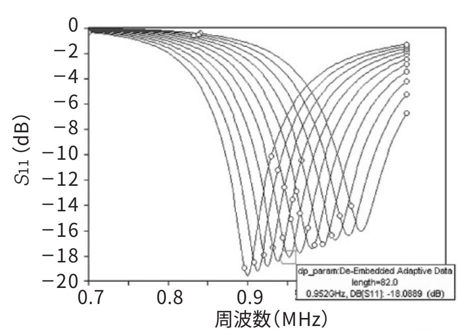



**図22　折り曲げダイポールの解析結果**
950MHz付近で共振しているのはエレメントが8.2cmのとき．

### ● アンテナの小型化

基板の誘電率を高くするとアンテナを小型化できることがわかりました．しかし，基板の材料を選べない場合は，別の手法で小型化することになります．

**図21**のように，エレメントを折り曲げたらどうなるのでしょうか．曲げた両端部の長さを2.6cm固定として，水平部の寸法をパラメータ・スイープすると，**図22**のような結果が得られました．950MHz付近で共振するのは，水平エレメントが8.2cmのときですから，アンテナの全長は13.4cmとほぼ変わりません．しかし，実装上の横寸法は60%程度になりました．

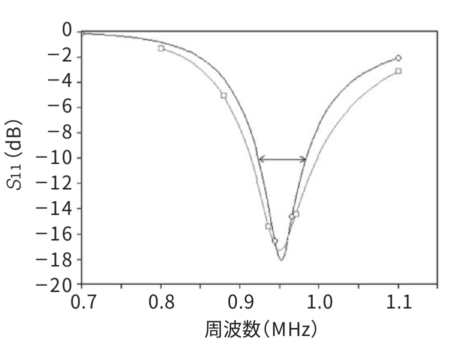



**図23　アンテナを変形したときの解析結果**
所望の周波数で共振するが，帯域幅がやや狭くなっている．

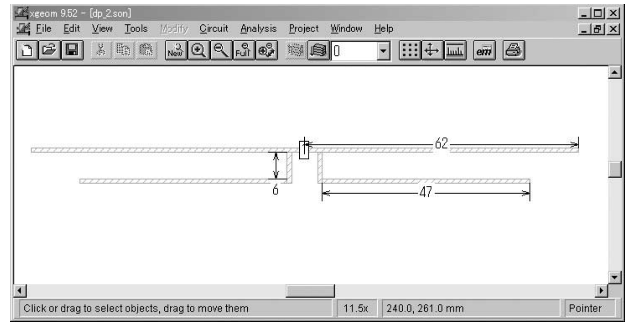



**図25　長さの異なるダイポール・アンテナのモデル**
接近した二つの周波数で使えることで広帯域化を実現できる．

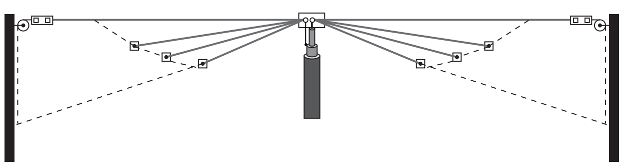


**図24　異なる長さのエレメントをもつマルチバンド・ダイポール・アンテナ**
一つで多バンドを運用できる．

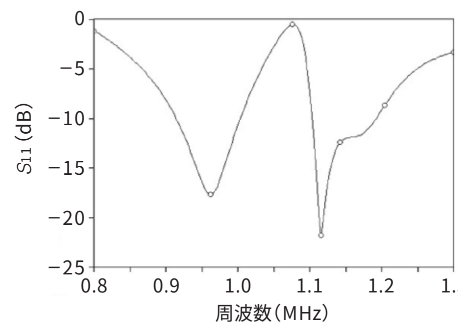



**図26　マルチバンド・ダイポール・アンテナの $S_{11}$**
1.08GHz付近に反射の大きい周波数帯ができてしまう．

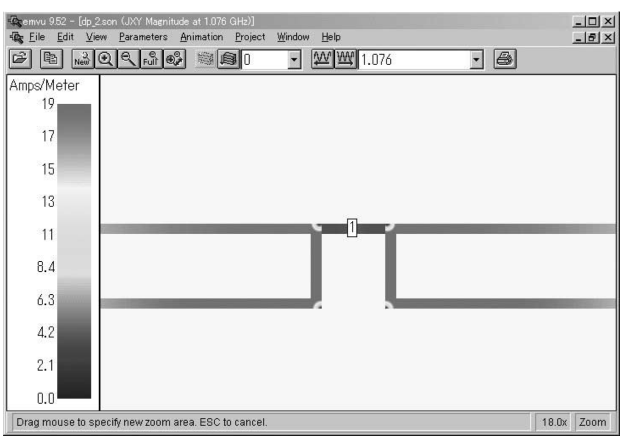



**図27　1.08GHzにおけるアンテナの表面電流**
給電点付近の電流値が小さくなっている．

アンテナを変形しても，所望の周波数で共振することがわかりましたが，**図23**に示すように−10dBの帯域幅が狭くなりました．

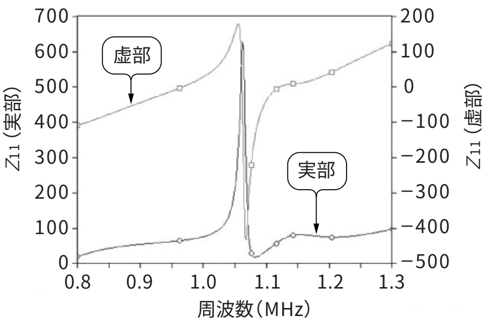
### ● アンテナの広帯域化

RFIDタグのアンテナは広帯域が望まれています．それはタグを貼り付ける金属や誘電体の影響を受けて共振周波数がずれても，動作範囲内に留めることができるためです．

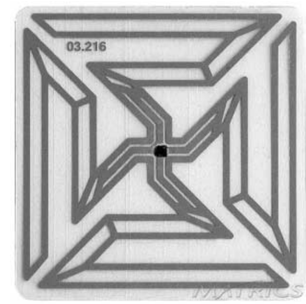
アマチュア無線では，狭い帯域ながらも複数の運用周波数帯が割り当てられており，一つで多バンドを運用できるアンテナがあれば便利です．例えば**図24**のように，異なる長さのエレメントを給電すると，マルチバンド・ダイポール・アンテナとして動作するアンテナが古くから普及しています．

そこでこのアイデアを使って，長さの異なるダイポール・アンテナのモデルを作ってみました．**図25**は，接近した二つの周波数で使えるため，広帯域化を実現できると考えたアンテナです．$S_{11}$の結果(**図26**)を見ると，確かに960MHzと1.12GHzでは反射量が少なく，空間に電磁エネルギーを放射していることがわかります．しかし，問題はこれらの中間である1.08GHz付近に反射の大きい周波数帯ができてしまうことです．これでは周囲の環境によって共振周波数がずれたとき，アンテナとして十分に動作しないことになってしまうでしょう．

1.08GHzにおけるアンテナの表面電流を調べると，**図27**のように給電点付近の電流値が小さくなっていることがわかります．**図28**は入力インピーダンス($Z_{in}$)を表示したグ




◀ **図28**
**マルチバンド・ダイポール・アンテナの入力インピーダンス**
1.08GHz付近で実数部が600 Ω以上ある．




▶ **写真2**
**卍形のUHF帯用RFIDタグ**
米国 Symbol Technologies社（旧Matrics社）の製品．

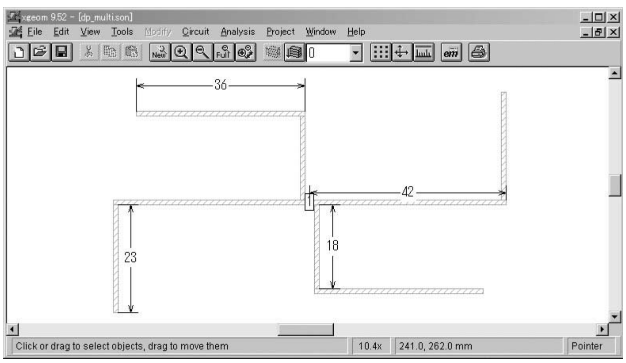



**図29　卍形に配置したエレメント**
水平部のエレメント全長は8.4cm，折り曲げられたエレメントは2.3cm．短いほうのエレメントは，垂直部が1.8cm，水平部が3.6cm．

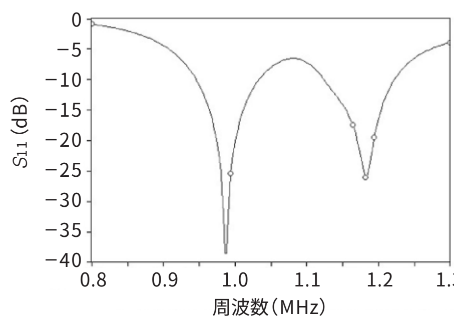



**図30　金属をタグの近くに置いたモデルの解析結果**
二つの周波数で共振しており，しかも広帯域で使えそうな結果が得られた．

ラフです．1.08GHz付近で実数部が600 Ω以上あります．また，960MHz付近と1.12GHz付近では，実数部が50 Ωに近く，虚数部はほぼ0 Ωです．1.08GHz付近では，虚数部がほぼ0 Ωで，実数部が高いので，反共振（本誌2005年1月号，pp.128-135の連載第8回を参照）の状態と考えられます．このアンテナを50 Ω系の線路で給電することを考えれば，残念ながら広帯域は実現できません．

Symbol Technologies社のRFIDタグには，**写真2**のような構造もあります．どのような動作なのか断定できませんが，二つのエレメントが直交することで，相互の電磁的な結合の影響が減らせるのかもしれません．そこで，このアイデアを使って，二つの異なる折り曲げダイポール・アンテナを使ったモデルを作ってみました．

**図29**は，卍（まんじ）形に配置したエレメントで，水平部のエレメントの全長は8.4cm，折り曲げられたエレメントは2.3cmになっています．また，短いほうのエレメントは，垂直部が1.8cm，水平部が3.6cmです．このアンテナは，**図30**に示すように，二つの周波数で共振点を示していることがわかります．これらの中間の周波数では反射係数が－7dB近くありますから，今度は広帯域で使えるアンテナができそうです．

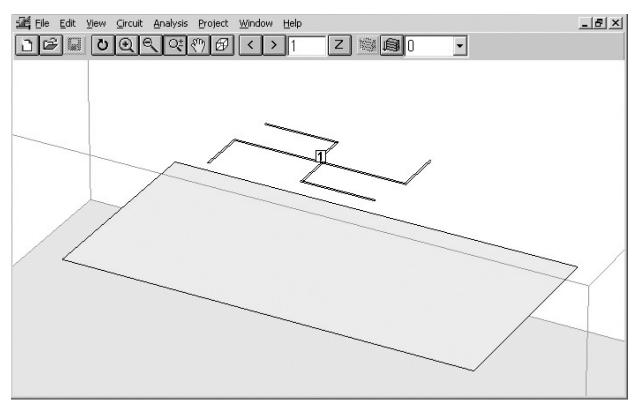



**図31　アンテナから5cm離れた位置に銅板を置いたモデル**
銅板の大きさは20cm × 10cm．

## ● アンテナの周囲にある金属や誘電体の影響

900MHz帯RFIDタグが，サプライ・チェーンにおける商品のトレースに使われる場合，金属やガラス，ビンなどの誘電体がタグの周囲にあることも想定しておく必要があるでしょう．これらの状況をシミュレーションするために，

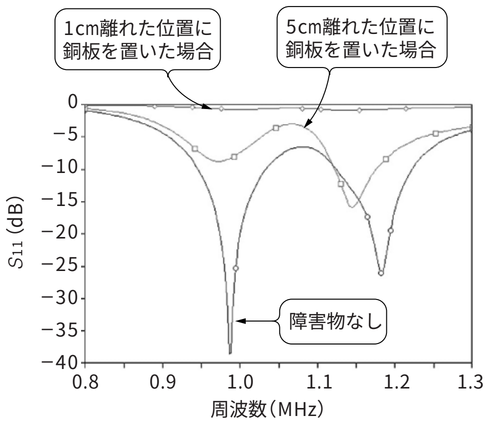



**図32　銅板を近づけた解析結果**

銅板が近づくに連れて，$S_{11}$（反射係数）が大きくなる．

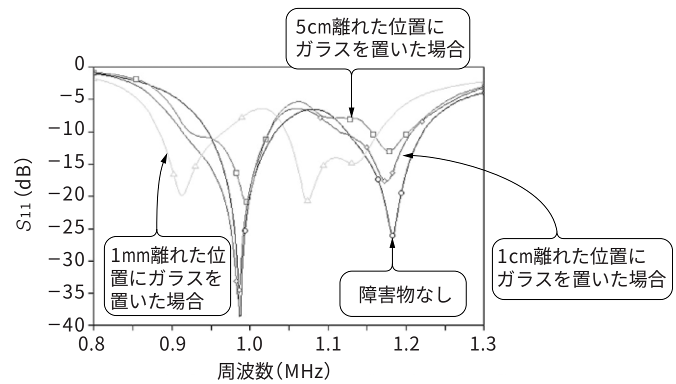



**図33　1mm厚のガラス板の解析結果**

アンテナに5cmから1cmまで近づけても，ほとんど問題はない．ガラスとの距離が1mmになると，100MHzほど低いほうへシフトした．

Sonnetの金属層を1層追加して，タグの近くに置いたモデルを作ってみました（**図30**）．

**図31**はアンテナから5cm離れた位置に，20cm × 10cmの銅板を置いたモデルです．1cm離れた位置に銅板を置いた場合と障害物がない場合を重ねて表示したグラフが**図32**です．銅板が近づくにつれて，$S_{11}$（反射係数）の小さい領域が減っていきます．このようにダイポール・アンテナは，自由空間では高性能ですが，近傍の金属の影響を受けやすいことがわかります．アンテナの周りの電界ベクトルの多くが銅板に向かうことを考えれば，空間に押し出されて放射に寄与する量が減ると想像できます．

次に，厚さがわずか1mmのガラス板（比誘電率7.0）を置いてみます．**図33**によれば，5cmから1cmまでアンテナに近づけても，ほとんど問題ないようです．しかし，タグとガラスの距離が1mmになると，100MHzほど低いほうへシフトしています．人体も誘電体としてモデリングできますから，手が触れた状態でも，やはり同じような現象が起こるでしょう．

このようにさまざまな周囲環境の変化を想定すると，アンテナはできる限り広帯域に設計しておいたほうが安全です．また，それにより，日・米・欧で少しずつ周波数が異なる900MHz帯のRFIDタグを，一つのアンテナでカバーできることにもなるのです．

## まとめ

今回は小型化・広帯域化が望まれる900MHz帯RFIDタグのアンテナについて調べました．日本では，総務省がRFIDタグ向けに950MHz～956MHzの割り当て（2005年春）を検討中ですが，近接周波数の携帯電話へ及ぼす影響から，リーダ/ライタの出力を下げる動きもあります．このため，タグのアンテナは，少しでも利得を引き出す必要に迫られるでしょう．RFIDはすでに多くのメーカで開発されています．今後，さまざまなアプリケーションに応じて，短時間で高性能のアンテナを設計する手法の確立が望まれています．

**参考・引用*文献**

(1) BYTE LAB；無線ICタグはどこまで読めるか，日経バイト，pp. 72-83，2004年6月号．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界，CQ出版社，2003年（第6版）．
(3) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2003年（第2版）．
(4) EPCglobal社のホームページ，http://www.epcglobalinc.org/
(5) 米国Symbol Technologies社のホームページ，http://www.symbol.com/

**こぐれ・ひろあき**
**小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）**
**http://www.kcejp.com/**